

ОПЫТ ОСВОЕНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК ГТЭ-150 АО ЛМЗ И ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ

Глушанов В.К.

АО ЛМЗ, г. Санкт-Петербург

В марте текущего года на ГРЭС-3 им. Р.Э. Классона АО «Мосэнерго» была принята в опытную эксплуатацию газотурбинная установка ГТЭ-150 производства АО «Ленинградский Металлический завод» («ЛМЗ»). В процессе испытаний установка достигла предусмотренные «Техническими условиями на поставку» показатели, в частности, электрическую мощность 155 МВт, балансовую температуру перед турбиной 1100°C и КПД около 31%. Данная газотурбинная установка стала самым мощным в России энергетическим агрегатом, принятым заказчиком в эксплуатацию.

Концепция создания этой турбоустановки предусматривала поэтапное повышение температуры газа перед турбиной с 950°C до 1100°C. Головной образец ГТЭ-150 был поставлен и пущен в эксплуатацию на ГРЭС-3 в 1990г. Сложная экономическая ситуация в стране, отсутствие целевого финансирования, снижение потребления электроэнергии промышленными предприятиями (в первую очередь - пиковой, на выработку которой первоначально была ориентирована ГТЭ-150) стали основными причинами затянувшейся доводки установки. В результате второй турбоблок был отгружен на ГРЭС-3 только в 1996г., но уже в январе 1997г. был принят в опытную эксплуатацию с мощностью 128 МВт при температуре газа перед турбиной 950°C (так же, как и на первом агрегате).

В феврале 1998г. в соответствии с программой повышения начальной температуры газа на одной из находившихся в эксплуатации турбоустановок был заменен ротор турбокомпрессора с лопатками турбины повышенной глубины охлаждения и полный комплект камер сгорания (направляющие лопатки турбины также были заменены). Именно в такой комплектации агрегат ГТЭ-150 (станционный № 5) и был сдан в начале апреля в эксплуатацию.

Газотурбинная установка (ГТУ) ГТЭ-150 представляет собой одновальный, трехпорный газогенератор с 15-ступенчатым компрессором, 4-ступенчатой турбиной и трубчатой камерой сгорания, которая состоит из 14-ти пламенных труб, переходных патрубков и 5-ти регистровых горелочных устройств (в каждой камере сгорания). Система сжигания - двухтопливная, хотя на ГРЭС ГТУ эксплуатируются только на жидком дизельном топливе. Для его равномерной подачи предусмотрены два компрессора пневморас-пыла со степенью сжатия около 2. В трассе подвода охлаждающего воздуха от компрессора к турбине имеются два воз-

ушно-водяных теплообменника. Поставка осуществляется в виде блочно-транспортного модуля, который перевозится вместе с фундаментом на железнодорожной платформе грузоподъемностью 220 т.

Установка ГТЭ-150 работает по так называемому «простому термодинамическому циклу» (в отличие от ГТ-100), однако ясно, что узлы ГТУ эксплуатируются в отнюдь не простых условиях. Это относится и к высоконагруженным лопаткам компрессора, элементам камеры сгорания, где в небольшом объеме надо оптимально сформировать поток с температурой в зоне горения факела 1800°C и расходом воздуха 610 кг/с , но в особенности - к лопаткам первых ступеней турбины, которые работают в условиях предельного термонапряженного состояния.

Повышение температуры газа перед турбиной потребовало спроектировать и изготовить на «Заводе турбинных лопаток» методом точного литья по выплавляемым моделям новые комплекты охлаждаемых лопаток турбины первых двух ступеней из жаропрочных сплавов, а также заменить материал и технологический процесс изготовления штампованных лопаток. Впервые появилось на лопатках и пламенных трубах термобарьерное покрытие - двуокись циркония. В процессе работ по снижению вредных выбросов в отработанных газах окончательно определился облик горелочных устройств - они стали пятирегистровыми, многофорсуночными. Изменилась система охлаждения пламенных труб и конструкция переходных патрубков. Таким образом, повышение температуры газа на 150°C кардинально изменило конструктивное лицо ГТУ.

Ни одна из энергомашиностроительных фирм за рубежом не обходится без натурных стендовых испытаний газотурбинных установок с полным комплексом исследовательских работ. Из-за отсутствия подобного стенда на АО «ЛМЗ» нам пришлось это делать в условиях промышленной эксплуатации - непосредственно на ГРЭС.

На стенде НПО «Центральный котлотурбинный институт им. И.И. Ползунова» (ЦКТИ) были проведены автономные испытания модели компрессора в масштабе 1:4 с несколькими вариантами облопачивания проточной части. В натурных условиях велись газодинамические испытания компрессора, исследована его рабочая линия, расчетно-экспериментальным путем определена граница помпажа и выбраны законы подачи топлива и потребной мощности тиристорного пускового устройства на запуске, найдены моменты закрытия антипомпажных клапанов. Найдено влияние углов установки входного направляющего аппарата на характеристики компрессора.

На стенде Научно-исследовательского конструкторско-технологического института Невского завода им. Ленина определялись собственные

частоты и формы колебаний рабочих лопаток компрессора, а в условиях работающей ГТУ велось тензометрирование рабочих лопаток первых четырех ступеней компрессора. Особенно подробно снимались напряжения на первой, трансзвуковой рабочей лопатке, длина которой 750 мм, а нагрузка от центробежных сил превышает 200 т. Преобразованный электрический сигнал от тензо-датчиков передавался бесконтактным путем с помощью антенно-транслирующей системы, разработанной Ленинградским электротехническим институтом связи им. Бонч-Бруевича.

Рабочие лопатки всех ступеней оснащены датчиками ЭЛУРа и амплитуды их колебаний оперативно контролируются и обрабатываются в темпе проведения эксперимента непосредственно на ГРЭС (НПО ЦКТИ и АО «ЛМЗ»).

В топочном отделе НПО ЦКТИ был сооружен стенд и проведены испытания натурного отсека камеры сгорания. При этом отрабатывался процесс сжигания жидкого топлива, была выбрана система охлаждения пламенной трубы и переходного патрубка. Особое внимание уделялось конструкции горелочного устройства и пламенной трубы, согласованная работа которых обеспечивает заданный закон радиальной неравномерности температуры газа перед турбиной и минимальную окружающую неравномерность потока. На этом же стенде проверялись мероприятия по снижению выбросов оксидов азота и химическому недожогу топлива. Как в стендовых, так и в натуральных условиях велось термо- и тензометрирование переходных патрубков, на одном из которых в процессе эксплуатации была вибрационная поломка. По сей день две камеры сгорания на ГТУ оснащены съемными зондами для траверсирования потока в переходных патрубках, что позволяет оперативно проверять внедряемые мероприятия по совершенствованию камер сгорания. В ближайшее время «сухая очистка» будет дополнена впрыском питательной воды в зону горения.

На основе разработок Санкт-Петербургского машиностроительного института внедрено запальное горелочное устройство циклонно-вихревого типа, которое в сочетании с системой пламяпереброса обеспечивает устойчивый поджиг камер сгорания на пуске с минимальным забросом температур газа.

Все штатные пламенные трубы на стенде НПО ЦКТИ подвергаются продувке по системе охлаждения для контроля пропускной способности отверстий перфорации. В Лаборатории проблем прочности (г. Санкт-Петербург) изготавливаются твердосплавные (карбид вольфрама) распылители топлива для форсунок и там же снимаются их расходные характеристики по результатам продувок.

На внутренние поверхности пламенных труб и фронтового устройства в ЦНИИ Материалов (г. Санкт-Петербург) наносится термобарьер

рное покрытие - двуокись циркония (сейчас этот процесс освоен на АО «ЛМЗ»).

Наибольший объем работ был проделан по турбине. Еще в процессе проектирования в физико-техническом отделе НПО ЦКТИ на моделях лопаточных аппаратов экспериментально (с визуализацией потока) определялся характер обтекания профилей, распределение коэффициентов теплоотдачи по обводу профиля со стороны газового потока.

После изготовления лопаток объем работ по исследованию их теплового состояния в стендовых условиях был выполнен во Всероссийском теплотехническом институте (ВТИ). На «пакетном» стенде при натурном соотношении температур газа и охлаждающего воздуха в блоке из трех лопаток проведено термометрирование охлаждаемых направляющих и рабочих лопаток первых двух ступеней турбины.

На первом этапе внедрения ГТЭ-150 при начальной температуре газа 950°C проводилось термо- и тензометрирование дисков и отдельных лопаток турбины с выводом сигнала через контактный ртутный токосъемник со стороны свободного конца вала турбины.

В настоящее время на действующей ГТУ термopарами НПО ЦКТИ оснащены направляющие лопатки первой ступени (включая термopары с открытым спаем для определения температуры газа), преддискорые полости подвода охлаждающего воздуха и коллекторные полости статорных деталей. Подробно препарирован блок среднего подшипника и вся трассировка подвода охлаждающего воздуха от компрессора к турбине.

Первый опыт внедрения на ГТЭ-150 оптического пирометра разработки Центрального института авиационного моторостроения - ВТИ оказался не удачным, но завод планирует в ближайшее время вновь заняться этой системой измерений и вообще уделить больше внимания системе диагностики по установке в целом.

Лопатки турбины всех ступеней как литые (равноосные), так и штампованные (4-я ступень длиной 750 мм) изготавливаются на АО «Завод турбинных лопаток», включая нанесение термобарьерного покрытия на охлаждаемые лопатки первых двух ступеней, проведение физико-химического анализа свойств металла лопаток, специальные прочностные и усталостные испытания.

Большая работа проделана ВТИ по виброналадке валопровода агрегата, который с учетом электрогенератора имеет семь опор, а также по комплексу теплотехнических измерений. Эти измерения ведутся на всех «базовых площадках» - 70, 100, 120 и 150 МВт, обрабатываются с помощью специально разработанного программного обеспечения и приводят к условиям ГОСТ 20440.

Система управления ГТУ имеет электрическую и гидравлическую

части. Алгоритмы автоматического регулирования ГТЭ-150 и их математические модели разработаны во Всероссийском энергетическом институте (г. Москва). В дальнейшем на АО «ЛМЗ» было подготовлено программное обеспечение электрической части системы регулирования и организована непрерывная запись основных параметров работающей ГТУ в информационном режиме. Используемая система управления позволяет в полуавтоматическом режиме вывести ГТУ на «полезную мощность» за время не более 15 мин.

В настоящее время на базе ГТЭ-150 на АО «ЛМЗ» разрабатывается проект газотурбинной энергетической установки ГТЭ-200, которая является форсированным по температуре и степени сжатия вариантом существующей установки с конструктивной модернизацией узлов, имеющих замечания и недостаточную эффективность. Необходимость модернизации и, прежде всего, в части повышения параметров цикла обусловлена общей тенденцией к использованию ГТУ преимущественно в парогазовых блоках, что требует повышения как эффективности газовой турбины, так и повышения температуры выхлопных газов.

С этой целью температура в камере сгорания повышается на 170°C , перед рабочими лопатками 1-ой ступени - на 95°C и на выходе - на 30°C . При одновременном повышении степени сжатия с 12,7 до 14 к.п.д. ГТУ составит 35 %, а при использовании в составе парогазового блока к.п.д. ПГУ составит 52 %. Сравнение параметров ГТЭ-200 и достигнутого на сегодняшний день уровня ГТЭ-150 с $T_{\text{г}} = 1100^{\circ}\text{C}$ дано в прилагаемой таблице.

При модернизации устаревшей установки ГТЭ-150 основным конструктивным изменениям подвергнутся:

Ротор. Исключается центральная «горячая» опора и сокращается межопорное расстояние с целью повышения стабильности вибрационных характеристик, общего упрощения конструкции, снижения расхода масла и воздуха на охлаждение.

Компрессор. Используется компрессор ЦИАН-ЦКТИ с к.п.д. 86 %.

Камера сгорания. Двухстадийное сжигание топлива в богатой и бедной областях камеры сгорания с целью снижения вредных выбросов.

Система охлаждения. Изменение структуры системы охлаждения горячей части с необходимым повышением эффективности охлаждения первых двух ступеней турбины. Исключение воздушно-водяных теплообменников.

В процессе проектирования установки ГТЭ-200 предполагается провести ряд научно-исследовательских работ, в том числе:

исследование направляющих и рабочих лопаток турбины (1-я и 2-я ступени) исследование камер сгорания с определением температурного состояния деталей и температурных полей.



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
ОТКРЫТОГО ТИПА
"ЛЕНИНГРАДСКИЙ
МЕТАЛЛИЧЕСКИЙ
ЗАВОД"

Перспективные Газотурбинные установки

ХАРАКТЕРИСТИКИ		ГТЭ-16	ГТЭ-25	ГТЭ-60	ГТЭ-200	ГТЭ-350
Мощность	МВт	16,7	26,9	62,5	196,0	344,8
КПД	%	36,5	46,0	36,2	35	38,3
Степень повышения давления		18,0	18,2	15,6	14,0	20,1
Расход газа на выходе	кг/с	46,1	55,4	184,4	609,0	758,0
Температура газа за ГТУ	°С	552	580	545	545	642
Содержание кислорода в выхлопных газах	%	13,36		13,5	13,56	11,5
Частота вращения вала ГТУ	мин ⁻¹	3000	3000	5441	3000	3000
Содержание NO _x	мг/нм ³	50	50	50	50	50

Данные о наработке установки ГТЭ-150, ст. №5 на 02.04.1999 г.

Наименование показателей	950С	1100 С
	Без спецкомплекта	С установкой спецкомплекта
Общее число пусков,	73	60
В том числе		
С набором нагрузки	11	31
Общая продолжительность работы, тыс. час,	297	702
В том числе под нагрузкой	251	652
Выработка электроэнергии, млн. кВт.ч	2,5	4,35
Максимальная нагрузка, МВт	136	155

ГТЭ - 200

на материальной базе ГТЭ - 150

основные показатели

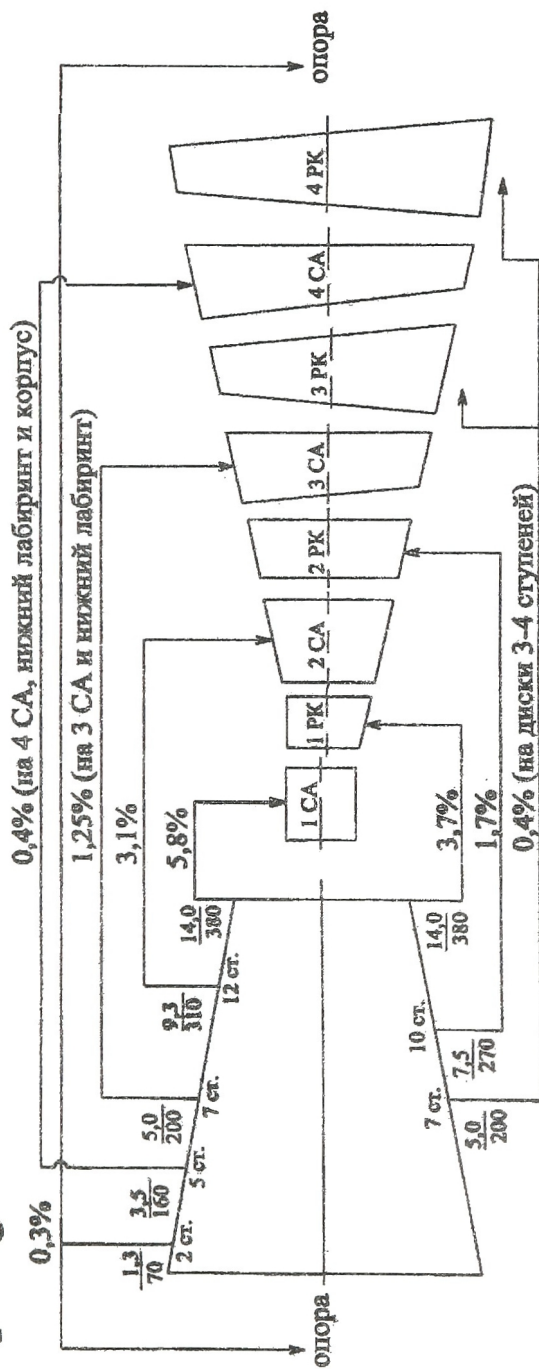
N п/п	Параметр	Размерн	Величина	ГТЭ-150 ГРЭС-3 ст №8
1	Мощность	МВт	196	148
2	КПД	%	35,0	30,6
3	Температура газа перед сопловым аппаратом турбины	°C	1270	1100
4	Степень сжатия в компрес.	---	14,0	12,7
5	Расход газа на выходе	кг/с	609	633
6	Температура газа на выходе	°C	545	513
7	Повышение температуры (перед РК1/ на выходе)	°C	95 / 32	---

Работа в составе ПГУ (2ГТ+1ПТ)

8	Мощность ГТ электрическая	МВт	185	---
9	Мощность ПТ электрическая	МВт	210	---
10	КПД ПГУ электрический	%	52,0	---

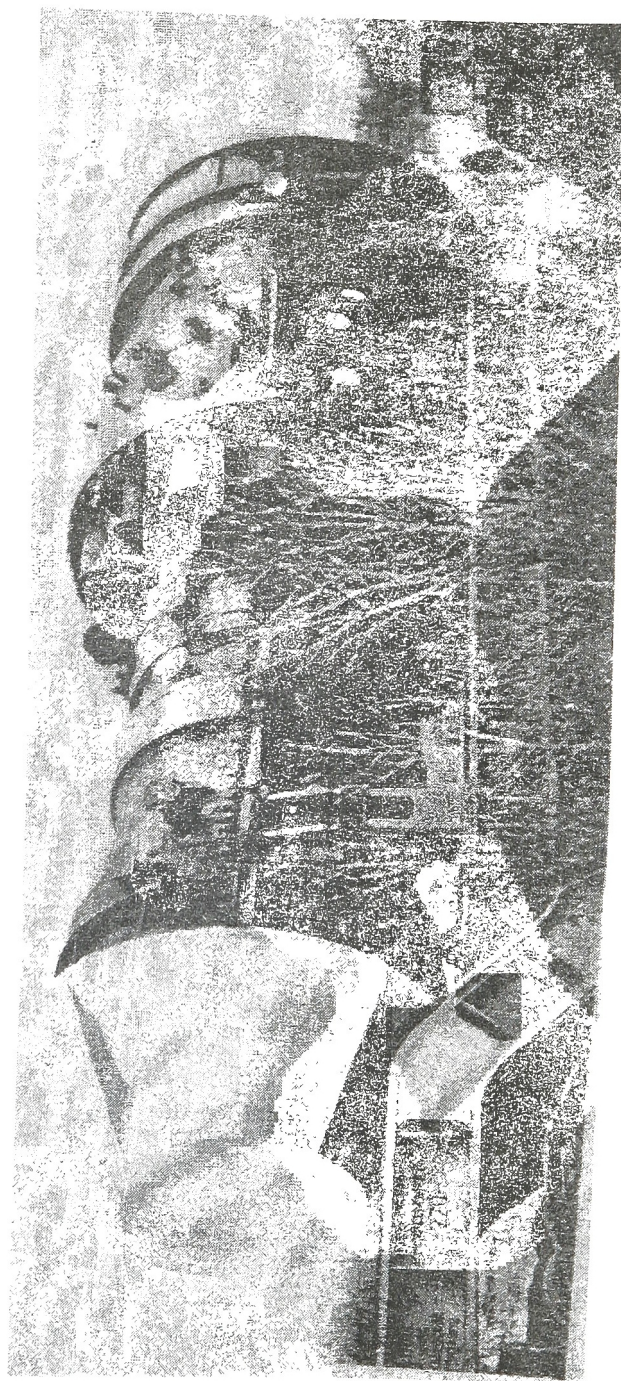
СТРУКТУРА СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ГТЭ-200

$$\frac{P}{T} = \frac{\text{кГ/см}^2}{^\circ\text{C}}$$



$$\bar{G} = \frac{G_{\text{вх}}}{G_{\text{пр.к.}}} = 16,65 \%$$

из них за горлом 1 СА - 12,95%
из промежуточных ступеней компрессора - 7,15%



Турбоблок ГТЭ-150 на платформе